



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**IMPLEMENTACE SYSTÉMU VERICUT DO
TECHNOLOGICKÉHO PROCESU VÝROBY**

IMPLEMENTATION OF THE VERICUT SYSTEM INTO THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF
PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Gerbel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jakub Gerbel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Martin Slaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Implementace systému VERICUT do technologického procesu výroby

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na implementaci nového obráběcího centra do systému Vericut. Cílem je vytvořit 3D model stroje, sestavit jeho kinematiku a doplnit stroj o databázi používaných nástrojů. Následně simulací otestovat správné sestavení kinematiky a databázi nástrojů na reálném obráběném dílu.

Cíle bakalářské práce:

- Definice problematiky a stanovení dílčích cílů.
- Rešerše teoretických předpokladů.
- Tvorba 3D modelu obráběcího centra a sady používaných nástrojů.
- Porovnání digitální simulace a reálného obrábění na zkušebním obrobku.
- Vyhodnocení odchylek simulace oproti reálnému stavu výroby.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

SADÍLEK, Marek. Progresivní strategie obrábění v CAD/CAM systémech: Progressive machining strategies in CAD/CAM systems: teze inaugurační přednášky ke jmenovacímu řízení profesorem v oboru Strojírenská technologie. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2019. ISBN 978-80-248-4275-2.

Virtuální CNC stroje na vašem stole. Strojárstvo: mesačník o strojárstve. Žilina: MEDIA/ST, 2010, 14(5), 98. ISSN 1335-2938.

MATOUŠEK, Ivo. Počítačová grafika a CAD: základy geometrického modelování I. V Liberci: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-251-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tématem této bakalářské práce je implementace verifikačního systému VERICUT do procesu výroby ve spolupráci se společností JHV Engineering. Na základě teoretického rozboru je provedena praktická část. Proběhlo vymodelování 3D modelu obráběcího CNC centra v systému Creo Parametric a sestavení jeho kinematiky v prostředí systému vericut. Byla provedena simulace a následná výroba fyzické součásti. Po vyhodnocení výsledků se ukázalo, že mezi simulací a reálným procesem dochází k určitým odchylkám. Při vytvoření takového přesné virtuální kopie stroje, nebo-li digitálního dvojčete, lze eliminovat kolizní stavy a efektivněji plánovat výrobu.

Klíčová slova

VERICUT, CAD/CAM systémy, CNC stroj, verifikace, frézování, simulace

ABSTRACT

The topic of this bachelor thesis is implementation of the VERICUT verification system into the manufacturing process in cooperation with company JHV Engineering. Based on the theoretical analysis is performed practical part. The 3D model of the CNC machining center was modeled in system Creo Parametric and its kinematic were compiled in the environment of VERICUT system. After evaluation the results, it turned out that there are some deviations between the simulation and the real process. By creating such an exact virtual copy of the machine, or digital twin, collisions can be eliminated and production can be planned more efficiently.

Key words

VERICUT, CAD/CAM systems, CNC machine, verification, milling, simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GERBEL, Jakub. Implementace systému VERICUT do technologického procesu výroby [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132415> . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 46 s. 3 přílohy. Vedoucí práce Martin Slaný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Implementace systému VERICUT do technologického procesu výroby** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jakub Gerbel

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Martinu Slanému, Ph.D za připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Velké poděkování patří také firmě JHV Engineering s.r.o za podporu a praktické rady, zejména Ing. Janu Chárovi, Janu Bastinovi a Ing. Zdeňku Kynclovi.

OBSAH

| | |
|--|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 4 |
| PODĚKOVÁNÍ | 5 |
| OBSAH..... | 6 |
| ÚVOD | 8 |
| 1 Trendy v technologii frézování..... | 9 |
| 1.1 CNC stroje..... | 9 |
| 1.1.1 Multifunkční obráběcí CNC centra..... | 10 |
| 1.2 Obrábění za pomoci robotů..... | 10 |
| 1.3 Spojení aditivní technologie s obráběním | 11 |
| 2 CAD/CAM Systémy | 12 |
| 2.1 CAD systémy | 12 |
| 2.2 CAM systémy..... | 13 |
| 2.3 Postprocesing | 13 |
| 2.4 Vybrané frézovací strategie..... | 14 |
| 2.4.1 Ponorné frézování | 14 |
| 2.4.2 Trochoidní frézování..... | 15 |
| 2.5 Aktuální trendy v CAM obráběcích strategiích | 15 |
| 3 ODCHYLKY SIMULACE A REÁLNÉHO OBRÁBĚNÍ..... | 17 |
| 3.1 MachineDNA dynamika stroje | 17 |
| 3.2 Interpolace NC kódu | 17 |
| 4 DIGITAL TWIN | 19 |
| 4.1 Virtuální zprovoznění..... | 19 |
| 4.2 Průmysl 4.0 | 20 |
| 5 IMPLEMENTACE STROJE DO PROSTŘEDÍ VERICUT | 22 |
| 5.1 Představení konkrétního obráběcího centra | 22 |
| 5.2 Kontrola skutečných rozměrů stroje | 22 |
| 5.3 CAD model stroje | 24 |
| 5.4 Sestavení a kinematika stroje v prostředí Vericut..... | 25 |
| 5.5 Řídící systém stroje..... | 26 |
| 6 VIRTUÁLNÍ OBRÁBĚNÍ | 28 |
| 6.1 Popis obráběné součásti | 28 |
| 6.2 Upnutí součásti..... | 28 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.3 | Návrh obráběcích strategií | 29 |
| 7 | SIMULACE A REÁLNÉ OBRÁBĚNÍ..... | 33 |
| 7.1 | Sestavení knihovny nástrojů | 33 |
| 7.2 | Simulace programu | 34 |
| 7.3 | Vyhodnocení simulace | 35 |
| 7.4 | Reálné obrábění..... | 35 |
| 7.5 | Odchyly simulace a reálného obrábění | 38 |
| | DISKUSE..... | 40 |
| | ZÁVĚR | 41 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 42 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 45 |

ÚVOD

Již několik desítek let jsou CNC obráběcí centra standardem pro strojírenské podniky. Investice na jejich pořízení se pohybují v řádech desítek milionů korun. Pro zajištění rychlé návratnosti investice je nezbytné zajistit efektivní využívání stroje. Efektivní využití stroje lze zajistit zejména optimálně naplánovanou výrobou, odladěním seřizovacích procesů, vhodnou volbou nástrojového vybavení, vhodnou volbou technologických a procesních podmínek a v neposlední řadě řízenou přípravou výroby, která dokáže obráběcí proces predikovat s co možná nejmenší odchylkou. Běžně dostupné CAM systémy disponují funkcemi pro detekci kolizních stavů a optimalizaci drah nástroje, ovšem jejich primárním cílem je tvorba obráběcích strategií a volba technologických podmínek. Oproti tomu verifikační systémy používají komplexnější postupy pro ověření správnosti výroby.

Simulace obrábění lze provádět v prostředí CAM systémů, nebo prostřednictvím verifikačních softwaru, mezi které patří právě systém Vericut. V tomto systému je možné odladit potenciální chyby které mohou vzniknout nejen při navrhování obráběcích strategií, ale také v interakci stroj – nástroj – obrobek. Díky využití systému Vericut, lze eliminovat například překročení limitů polohovacích systémů stroje nebo zamezit kolizním stavům. Práce probíhá ve spolupráci s firmou JHV Engineering s. r. o., která se zaměřuje na vývoj výrobních linek a robotických pracovišť s vlastní strojírenskou výrobou.

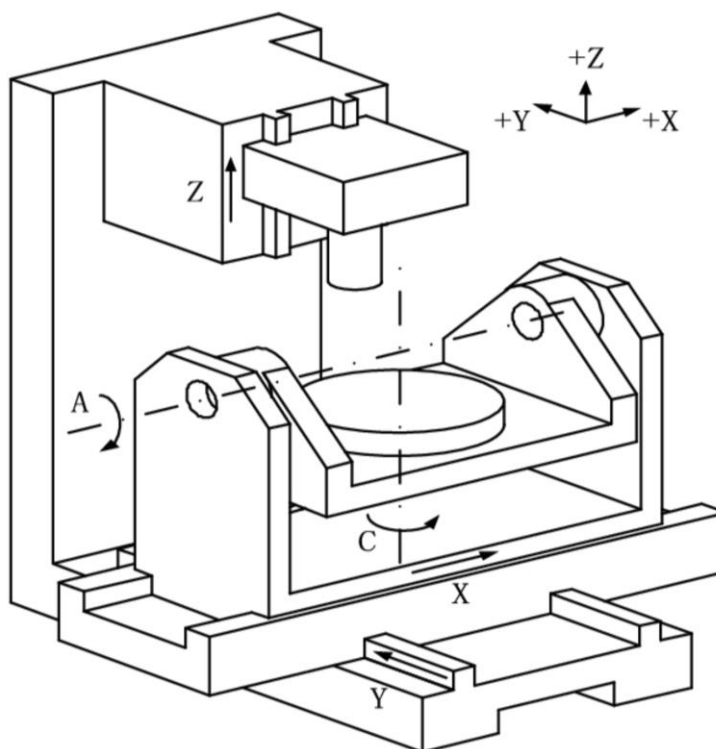
V této práci je nejprve proveden rozbor týkající se problematiky a jejích aktuálních trendů, zejména v oblasti technologie frézování a CAD/CAM systémů. Dále se pojednává o faktu, že mezi simulací a reálným obráběním dochází k určitým odchylkám a nepřesnostem, zejména v predikci strojního času. Tvorba digitálního dvojčete stroje, je úzce spojována s Průmyslem 4.0, který je velmi aktuálním tématem pro český průmysl a ekonomiku, proto je v této práci zmíněn.

V praktické části je vymodelováno obráběcí centrum a implementováno do prostředí systému vericut, kde je sestavena jeho kinematika a vytvořena knihovna nástrojů pro obrábění dané součásti. Virtuální simulace obrábění zvolené součásti na daném stroji bude ověřena reálnou výrobou. Dále bude zpracováno porovnání simulovaných výrobních časů jednotlivých operací a dosažených výrobních časů při výrobě.

1 TRENDY V TECHNOLOGII FRÉZOVÁNÍ

1.1 CNC stroje

Oproti konvenčním strojům se liší tak, že hlavní pracovní funkce stroje jsou řízeny systémem pomocí programu. Číslicové řízení – činnost počítače pro řízení pohybu nástroje nebo obrobku. Všechny potřebné informace pro obrobení, jako jsou rozměry součástí, otáčky, posuv a pomocné parametry, jako je zapínání chladicí kapaliny jsou zaznamenány ve formě řady numerických znaků. Stroj je zkonstruován a řízen, tak aby mohl pracovat v automatickém cyklu a měl automatickou výměnu nástrojů. Od základních tříosých strojů (lineární posuv v osách X, Y a Z) až po stroje, které mohou pracovat v devíti osách a umožňují obrábět tvarově velmi složité a přesné součásti. 2D obrábění umožňuje vyřezávat dvojrozměrnou geometrii do určité hloubky, která je ve všech místech stejná. Stejný princip se používá při gravírování nebo řezání laserem. K obrábění jednoduchých kapes, drážek, ostrůvků se využívá 2,5D obrábění. 3D frézování umožňuje řízení tří os současně a má dva obráběcí cykly. Při hrubování dochází k velkému úběru materiálu, naopak při dokončování se vytváří výsledný tvar obrobku. Po přidání čtvrté osy na stůl stroje lze obrábět ve 4D. Čtvrtá osa může být realizována v jedné z rotačních os A, B, C. 5D obrábění – řízení pěti os současně, lineární posuv v osách X, Y, Z a rotační pohyb ve dvou osách, poskytující různé možnosti pohybu a naklápění se stolem nebo frézovací hlavou např. sestavení s kolébkou (obr.1.1), která se naklápí v rotační ose A nebo B, zároveň se obrobek otáčí v rotační ose C. Kolébka je upevněna na stole pohybujícím se lineárně v ose X a Y. Vřeteno koná pohyb po ose Z. [1], [2]



Obr.1.1 schéma pětiosé CNC frézky s kolébkou [3].

1.1.1 Multifunkční obráběcí CNC centra

CNC frézky ani soustruhy se principiálně příliš neliší od konvenčních strojů, hlavním rozdílem je, že stroj je řízen počítačem. Multifunkční obráběcí centrum umožňující obrobení součásti na jedno upnutí, což má pozitivní vliv na přesnost obrábění, vyšší jakost a úsporu výrobního času. Spojuje dvě základní operace třískového obrábění – soustružení a frézování. Je charakteristické, že jedna z operací je dominantní a druhá doplňková. Pak jsou tato centra považována primárně pro obrábění rotačních nebo nerotačních obrobků, ovšem ani jedna ze dvou základních operací není dominantní co se týče přenášení výkonu. Aktuálním trendem je tyto rozdíly výkonů pro různé operace přibližovat. [1]

1.2 Obrábění za pomoci robotů

Nasazení robotů jako obsluha u obráběcího centra (obr.1.2) se začínají objevovat v podnicích čím dál častěji, zejména pro sériovou výrobu. Kdy lze dosáhnout o 50 % vyšší produktivitu, díky 24 hodinovému provozu. Robot zde plní pouze manipulační úkony, ovšem při frézování pomocí robotu je frézovací hlava umístěna na šesté ose robota. Pracovní plocha je definována rozsahem robota což je u středně velkých průmyslových robotů zhruba 7-8 m³ pracovního prostoru, ovšem pokud se samotný robot připojí na lineární pojezd a získá tak sedm os. Frézování lze provádět s přesností cca +/- 0,4 mm (u dílů z uhlíkového laminátu) [4]. CNC obráběcí stroje mají tři nebo čtyři stupně volnosti, což je pro většinu strojních operací dostačující, ale může to být v některých případech omezující. Průmysloví roboti mají stupňů volnosti šest, což umožňuje obrobit téměř jakoukoliv součást. Tuhost stroje velmi ovlivňuje přesnost samotného obrábění, pro roboty je tuhost méně než 1 N/μm a pro CNC stroje více jak 50 N/μm. Nejčastěji obráběné materiály za pomoci robota jsou plasty, kompozitní materiály, popřípadě dřevo a některé kovy. [5], [6]



Obr.1.2 Obrábění součásti z kompozitového materiálu pomocí robota [7].

1.3 Spojení aditivní technologie s obráběním

Aditivní technologie se obvykle používá při výrobě tvarově složitých součástí s vnitřními dutinami, vytváření jednorázových nebo nestandardních výrobků. Využívá velké volnosti, která umožní vyrábět i velmi nekonvenční tvary. Výhody přináší při rychlém návrhu prototypů, ale také při individuální úpravě normalizovaných výrobků. Koncový výrobek, který tvoří celá soustava jednotlivých součástí může být při 3D tisku zhotoven jako jeden díl, což je výhodnější než vyrábět součásti vyrábět a spojovat konvenční cestou. 3D tisk je v současné době jeden z největších trendů v průmyslu. Stále je potřeba urychlit a zlepšit některé procesy. Například neumožňuje dynamické sledování procesu, což je u konvenčního obrábění běžné. Oproti tomu vysoká produktivita u standardních dílů, vysoká přesnost a jakost povrchu, kterou disponuje konvenční CNC obrábění. Spojením toho nejlepšího z obou metod vzniká hybridní výroba (obr.1.3). Základním principem je vytvoření objektu pomocí aditivního procesu a následné obrobení funkčních ploch. Tento způsob nachází uplatnění v nových přístupech, při návrhu a tvorbě součástí v řadě nových odvětví. [8], [9], [10]



Obr.1.3 LASERTEC 65 3D hybridní výrobní systém [10].

2 CAD/CAM SYSTÉMY

Jedná se o jednu z podoblastí komplexního systému sledování životního cyklu výrobku PLM, kde mají tyto systémy na starost konstrukci, vývoj a přípravu výroby daného produktu. Podniky, které nemají implementovaný systém PLM, musí tuto podoblast stejně využívat. Jelikož je natolik stěžejní pro konkurenční schopnost, proto CAD/CAM systémy bývají minimem které konstrukční/výrobní firmy mívají v rámci softwarových podpor. [11], [12]

2.1 CAD systémy

CAD (Computer Aided Design) počítačem podporované konstruování. Oblast využití těchto systémů je široká od strojírenství až po zdravotnictví za použití 2D i 3D aplikací. Výhodou je možnost práce více konstruktérů či technologů na jednom velkém projektu, tato práce je efektivnější a časově méně náročná. K tomuto napomohli různé sdílené úložiště – cloud, které jsou v dnešní době již hojně rozšířené. Výhody jsou nejen v návrhové a konstrukční fázi projektu, nebo výroby, ale také snadné a kompaktní vizualizaci dat přímo během montáže, či výroby.

První rozdělení CAD systémů dle velikosti, resp. množství funkcí, které daný software nabízí. To se velmi znatelně projeví na ceně licence, která se může pohybovat kolem milionu korun za jeden rok.

- Malé: vhodné pro 2D náčrty, omezené nebo žádné možnosti programování. Většinou se jedná o Lite verze, které mají jen některé základní funkce oproti plné verzi. Využití při návrhu dílu pro 3D tisk. Např. AutoCAD LT
- Střední: 2D i 3D aplikace jako jsou - výkresová dokumentace, 3D modely, propojení celé sestavy, základní simulace. Možnost naprogramování různých nástaveb, tedy otevřená architektura. Základ pro strojírenskou výrobu. Např. Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Rhinoceros (především plošné modelování).
- Velké: Systémy jsou tvořeny ze specializovaných modulů a zákazník si vybere moduly, které bude potřebovat pro svoji aplikaci. Moduly nejen pro běžné CAD/CAM, ale např.: ergonomie prostředí, navrhování celých výrobních linek a různé analýzy. Určeno pro práci s velkými sestavami až tisícovky dílů. Např. PTC Creo, Catia, Siemens NX.

Dále se CAD systémy dělí na parametrické a neparametrické, kde je odlišný způsob modelování a následná možnost úprav. Při práci s neparametrickými systémy je třeba zadávat požadované konstrukční prvky s přesně zadaným rozměrem a polohou. Není možné zvolené prvky zavazbit (např. kolmost, rovnoběžnost, soustřednost apod.). Neexistuje žádná historie modelu, takže nelze provést úpravu o několik kroků zpětně, nebo upravit již vložený prvek.

Právě naopak fungují parametrické systémy. Tvorba a úprava prvků se řídí pomocí zpětně upravitelných parametrů. Ve stromu modelu se nachází jednotlivé, na sobě závislé prvky. Ovšem při importu dat z jiného CAD softwaru, v podobě neurálních souborů, je získán neparametrický model a je potřeba pracovat s neutrálními soubory a není možnost upravit technologické kóty a vazby. Pro další práci s těmito soubory je třeba částečně nebo úplně přemodelovat dané objekty, což je většinou časově náročné a pracné. Řešením je například

funkce „Feature recognition“, jak je patrné z anglického názvu, funkce umí rozpoznat jednotlivé prvky v modelu a následně s nimi dále pracovat [13].

S inovativním přístupem přichází software Shapr3D, který umožňuje pracovat pouze v prostředí tabletu, za pomoci pera a prstů. Jedná se o první software svého druhu na trhu a obsahuje téměř veškeré funkce středních systémů (Aktualizace v březnu 2021 přidává možnost tvorby výkresové dokumentace) [14]. Velice kompaktní a uživatelsky přátelské prostředí vytváří pohodlný nástroj jak pro začátečníky, tak profesionály. Umožňuje vytvořit rychle a efektivně orientační model či sestavu např. přímo během vývojové konzultace s obchodními zástupci, nebo v jiných aplikacích.

2.2 CAM systémy

CAM (Computer Aided Manufacturing) počítačem podporovaná výroba. Systém je schopen vytvořit program z drah nástroje, z použitých nástrojů, pohybů stroje, rezných podmínek atd., pro obrobení výrobku na CNC stroji. Data se většinou importují z běžných CAD systémů např. Creo, Catia či Solidworks ve formátu IGES či STEP, nebo se mohou vytvořit přímo v CAM, proto je spousta systémů řešena jako CAD systém s modulem CAM. Výstupem jsou data ve formátu NCL (CLDATA – cutter location data), které je potřeba přeložit v postprocesoru do datového jazyka (NC programu) konkrétního obráběcího stroje [15].

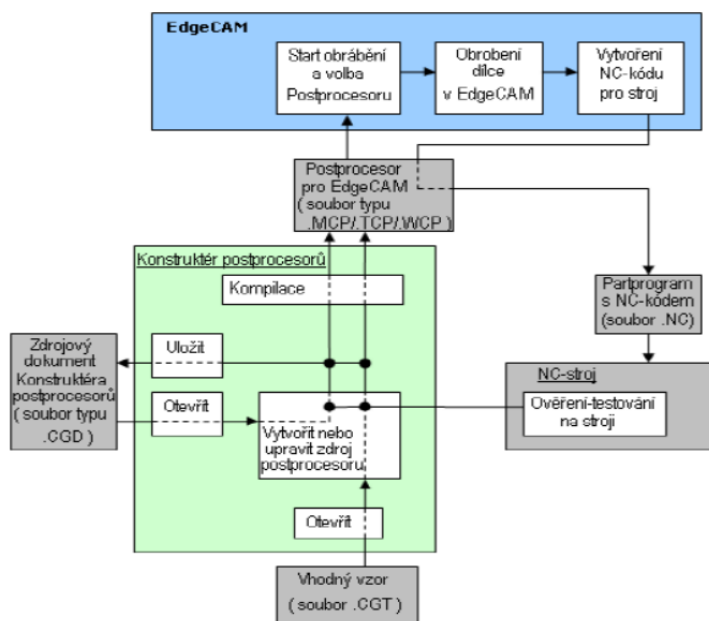
Mezi nejpoužívanější CAM systémy patří:

- PowerMill
- Solid Edge
- NX CAM
- GibbsCAM
- MasterCam
- SolidWorks CAM

2.3 Postprocessing

Díky využití CAD/CAM systémů se razantně snížil čas předvýrobních časů a byl umožněn velký pokrok v obrábění obecnějších ploch. Proto je třeba generovat v CAD/CAM systémech NC kódy a k tomu se využívají programové moduly tzv. postprocesory [16].

Postprocesor je softwarový překladač, transformuje data modelu, dráhy nástroje a parametrické nastavení stroje do normalizovaného kódu daného řídicího systému. Je potřeba do něj importovat veškeré potřebné informace a parametry daného stroje. Jelikož na trhu je nespočet různých CNC strojů a řídicích systémů, tak neexistuje žádný univerzální postprocesor. Přichází v úvahu více variant: To lze řešit například zakoupením postprocesoru kupovaného na míru, využívat externí postprocesor, najít v databázi dodavatele nějaký, který bude pracovat dostatečně dobře pro potřebnou aplikaci, nebo vytvořit vlastní postprocesor. Ten lze naprogramovat manuálně, nebo existují systémy, které umožňují uživatelskou konstrukci postprocesoru např. EdgeCAM (obr.2.1).

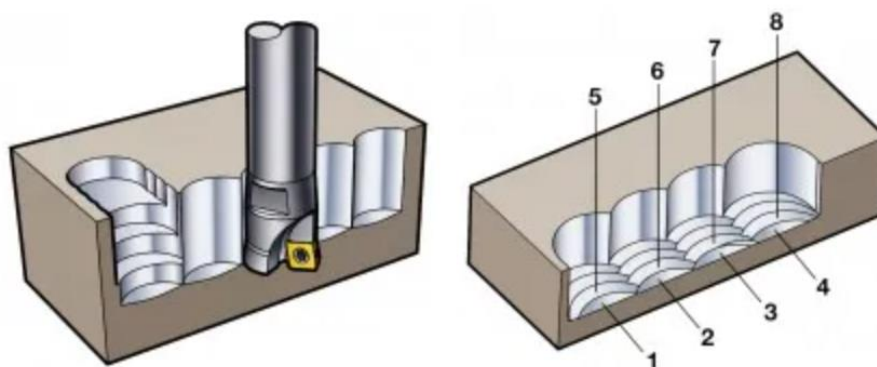


Obr.2.1 Schéma průběhu tvorby postprocesoru [17].

2.4 Vybrané frézovací strategie

2.4.1 Ponorné frézování

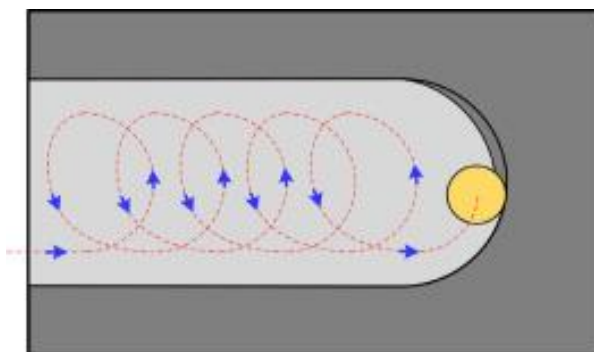
Také nazývané jako obrábění v ose Z, při němž se frézuje čelem nástroje místo obvodem (obr.1.4). Řezné síly směřují v axiálním směru, tedy ve směru vřetene a tím dochází k zamezení vzniku vibrací. Proto je nutné použít stroj, který má vřeteno s axiálními ložisky namísto radiálních. Vhodné použití této metody je při frézování, kde vyložení nástroje přesahuje $4 \times DC$ tedy aplikace pro 3D frézování například výroba forem, ale obecně prvky jako drážky, dutiny/kapsy a rohy. Je zásadní zajistit dobré odvádění třísek řeznou kapalinou nebo stlačeným vzduchem. Použití ponorných fréz předchází snižování řezných podmínek kvůli vyhnutí nástroje a vznik následných vibrací nebo zhoršení jakosti povrchu. Používá se i ponorné vrtání s vrtacími nástroji, efektivita této metody je až do průměru $DC = 35 \text{ mm}$. Principiálně se dá přirovnat ponorné frézování k vrtacím operacím. [18], [19]



Obr.1.4 Schéma ponorného frézování [18].

2.4.2 Trochoidní frézování

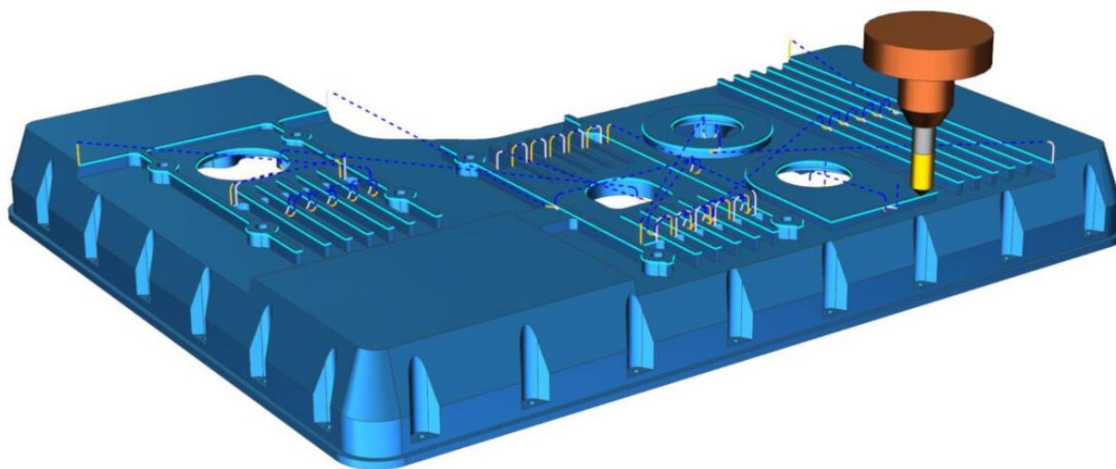
Frézování s využitím trochoidního pohybu nástroje se využívá především v případě odebrání velkého objemu materiálu. Úspora času a hlavně nižší opotřebení nástroje je způsobeno skutečností, že se udržuje minimální úhel záběru a tím se redukuje chvění nástroje. Během této metody dochází k frézování po kruhové interpolaci se současným posuvem vpřed v radiálním směru, při velkých hodnotách axiální hloubky řezu a nízkých hodnotách radiální hloubky řezu ne vyšších než 10% nástroje. Během kruhové dráhy (obr.1.5) pouze přední polovina nástroje odebírá materiál a díky tomu je lépe odváděno nahromaděné teplo. [20], [21], [22]



Obr.1.5 Pohyb nástroje při trochoidním frézování [20].

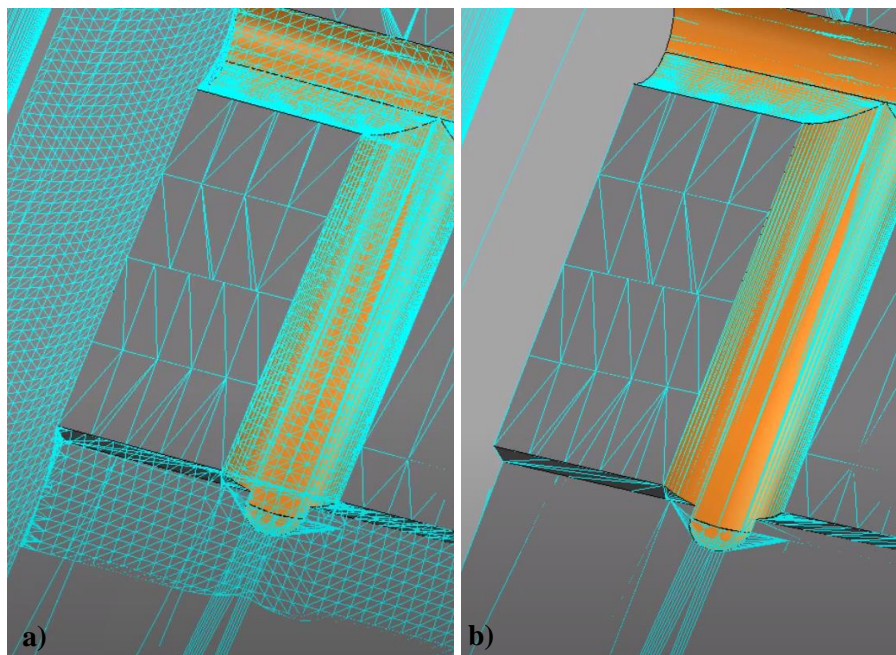
2.5 Aktuální trendy v CAM obráběcích strategiích

Planar Deburring (obr.2.2) – plošné sražení hran, nová výrobní funkce, která pomáhá automatizovat a zrychlit programování (až o 95%) jedné z nejvíce používaných operací a to zkosení hran. Software automaticky rozpozná prvek rohu a vytvoří optimalizovanou dráhu nástroje pro požadovanou velikost sražení. Je možné také specifikovat rozměry děr které se mají vynechat. Metoda také umí eliminovat znovu obrobení stejného místa a je dostupná v rámci systému NX CAM [23].



Obr.2.2 Automatizovaná strategie pro plošné sražení hran [23].

Model filleting – zaoblení modelu, v nové verzi PowerMill 2021, dochází k zaoblení modelu pouze v místech zaoblení omezené hraniční křivkou. Software redukuje triangly pouze v místě obrábění (obr.2.3.b), nikoli ve všech ostatních rádiusech modelu jako tomu bylo v předchozích verzích (obr.2.3.a). Benefitem je rychlejší výpočet drah nástroje a lepší manipulace s modelem v prostředí systému. Při výkonostním testu firmou CAD Studio, byla zjištěna časová úspora 12 % oproti předchozí verzi [24].



Obr.2.3 a) běžný způsob tvorby sítě prvků, b) nový způsob tvorby sítě prvků [24].

3 ODCHYLKY SIMULACE A REÁLNÉHO OBRÁBĚNÍ

Pro kvalitní plánování výroby je třeba mít dobrý přehled ohledně výpočtu strojního času. Hodnoty poskytované CAM i verifikačními systémy jsou nepřesné. Ovlivňujícím parametrem je způsob generování pohybu řezného nástroje. Dříve se při hrubovacích strategiích generovaly pohyby pouze na základě modelu finálního obrobku, nebo byl model polotovaru v některých místech natolik komplikovaný, že software nebyl schopen vytvořit strategii řezného pohybu, ovšem díky možnosti grafické simulace šlo poukázat na chybnost zvolené strategie. Dnešní systémy už mohou pracovat s návazností na skutečný technický stav stroje. Patrně největší odchylky mezi simulací a reálným obráběním nastávají při predikci simulovaného času obrábění. Při tvorbě NC programů se programátoři zaměřují především na volbu samotných obráběcích strategií a technologických podmínek. Není proto brána v úvahu dynamika stroje a dá se předpokládat, že má největší vliv na odchylky strojních časů. [25], [26]

3.1 MachineDNA dynamika stroje

Metoda, která je schopná optimalizovat a zefektivnit frézování. Technologie vychází z kalibrace a stavu obráběcího stroje a získání dat, které odesílá do CAM programu. Principiální postup je následný. V CAM softwaru se vybere obráběcí stroj, na kterém se bude obrábět. Vygeneruje se diagnostický soubor, který se spustí na stroji. Začne probíhat sběr dat, stroj se spustí a začne pohybovat v rovině XY řezným nástrojem po zmenšujících se kružnicích. Program měří odezvu, jakou je stroj schopen zvládat kruhovou dráhu, ten následně zaznamená údaje ze snímačů. Výsledkem je získání reálných kinematických a dynamických parametrů stroje. Soubor s parametry se zpětně nahraje do softwaru a ten analyzuje data, která dosadí je do požadovaných obráběcích strategií. MachineDNA dokáže zohlednit fakt, že každý stroj má v různém období odlišné parametry, nebo kdy mají stroje rozdílnou rychlost čtení i zpracování NC kódu a také, že ne každý stroj je schopen zpracovávat křivky. Upraví minimální rádius trochoidy, tak aby stroj sám nezpomalil, ale i nadále toleroval dráhu, jelikož při různorodosti strojů není záruka, že bude schopný frézovat například rádius 5 mm při posuvu 10 000 mm/min. Takovéto zjištění aktuálního stavu stroje se neprovádí při obrobení každé součásti, ale většinou po rozsáhlejšímu servisu. Testování společností Delcam (V současné době je již Delcam integrováno do společnosti Autodesk), jenž MachineDNA vyvíjela, ukázalo úsporu obráběcího času až 60 %. [26], [27]

3.2 Interpolace NC kódu

U většiny běžných CAM systémů se pro výpočet drah nástrojů vypočítávají uzlové body CC (cutter-contact points) dle geometrie modelu. Následně je offset nástroje zahrnut do výpočtu a tím je možné určit jednotlivé polohy řezného nástroje CL (cutter-location points), které se používají pro vytváření bloků NC programu a jejich následné použití při tvorbě trajektorie nástroje, pomocí lineární interpolace přímkových segmentů se spojitostí C^0 . Systém vytvoří délky segmentů, tak aby se vešli do tolerančního pole, definovaného programátorem. Menší tolerance pásma znamená, že trajektorie nástroje se bude více blížit původnímu modelu. [27], [28]

První časové odchylky se objevují už při zpracování dat 3D modelu, který má ideálně hladký povrch, ale v systému jsou nastaveny úchyly přesnosti lineárních úseků, které nahrazují povrch modelu. V případě že by dráha nástroje měla být opravdu lineární a procházet všemi zlomovými body musela by rychlost klesat v každém bodě na nulu, což by znamenalo dosažení pouze minimálních posuvových rychlostí. Vzrostl by neúměrně čas obrábění a také by se to podepsalo na kvalitě povrchu, kvůli častému dynamickému kolísání. Běžným řešením tohoto problému je funkce Lookahead (Náhled vpřed), která už dopředu načte NC bloky a ve zlomových bodech určí toleranční pásmo, které dovolí průjezd nenulovou rychlostí a zapříčiní odchýlení od skutečné polohy nástroje. V praxi se ještě výsledný čas násobí přepočítávacím koeficientem, který udává přesnější čas, volený pro konkrétní druh strategie a stroj, ovšem ani po tomto kroku nelze považovat čas za přesný. [27], [28]

4 DIGITAL TWIN

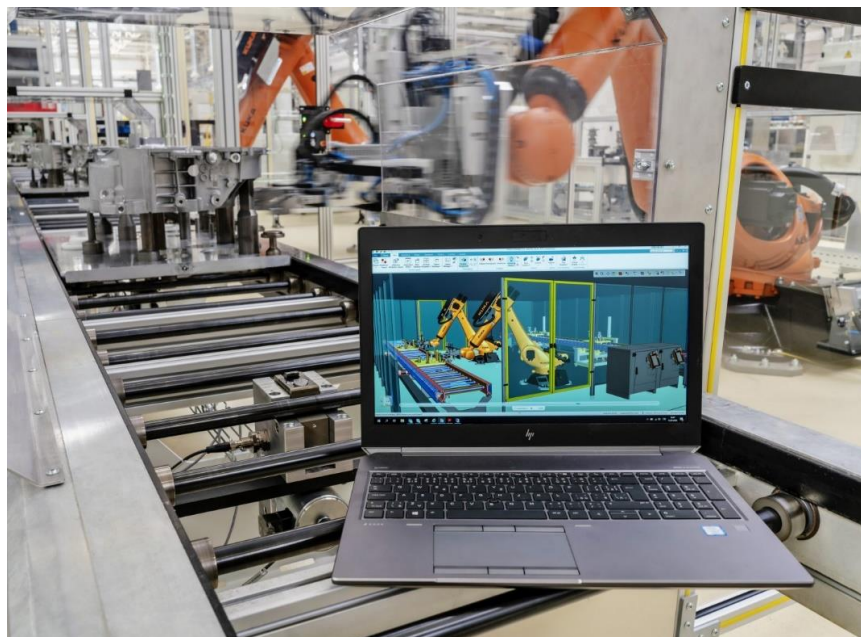
Digitální dvojče je pojem, pod kterým je možné si představit určitý reálně existující CNC stroj, který je převeden do virtuálního prostředí za účelem simulace výroby, ověření NC kódu a dalších prvků optimalizace. Tedy reálné výrobní procesy, lze provádět na virtuálním modelu. Čím dál více náročnější požadavky na výrobu složitých součástí v konkurenčním prostředí, vyžadují bezpečnou bezkolizní výrobu a efektivní využití stroje. Digitální dvojče lze využít nejen pro obráběcí stroje, ale také pro celou výrobní linku, robotické pracoviště a v dalších aplikacích. Proto je tato technologie úzce spojena s aktuálním rozvojem Průmyslu 4.0. Verifikační nástroje obsahují zpravidla i běžné CAM systémy, které se zaměřují spíše na tvorbu samotných obráběcích strategií, ovšem verifikační systémy používají komplexnější postupy v ohledu simulace a verifikace. Dalším benefitem je zcela určitě případ obrábění na víceosých CNC centrech, kde se investice mohou vyšplhat až na stovky milionů za stroj a v těchto případech je ověření kolizí velmi věcné. Může třeba dojít k chybě při překladu v postprocesoru a například jediné špatné otočení souřadného systému může vést k zničení nástroje, nebo celého stroje. Faktem je, že stoprocentní výsledky vyplynou, až z reálného obrábění, ovšem řídit se pravidlem „pokus – omyl“ v oblasti takto velkých investic není moudré. Systém Vericut od společnosti CGTech je přímo zaměřený na výše zmíněnou problematiku a v jeho prostředí se bude pracovat v další části této práce. Vericut je samostatný modulární systém, který disponuje možností integrace do většiny CAM systémů. Verifikovat není možné pouze pro třískové obrábění, ale v aktuální době se objevují moduly pro čistě aditivní nebo hybridní výrobu. [29], [30], [31]

Modul Verify – Verifikace, detekuje chyby v NC programu, obrábění rychloposuvem, např. kolize s přípravky, stopkou nástroje nebo sklíčovými a obrábění rychloposuvem. Vericut je schopen přesně emulovat logiku řídicího systému, definovat a simulovat řezný nástroj, který je možno importovat z CAD systému, nebo přímo sestavit v tomto prostředí [29].

Modul OptiPath – Optimalizace dráhy, systém vypočítá přesné řezné parametry (hloubka, šířka a úhel řezu), společně s ubraným objemem materiálu a rozdělí dráhu na menší segmenty, kterým přiřadí nejvhodnější rychlost posuvu s porovnáním odebraného materiálu v daném segmentu. Po přepočtu rychlosti posuvu se změny projeví v nově vytvořeném NC kódu, přičemž trajektorie dráhy se nezmění [29].

4.1 Virtuální zprovoznění

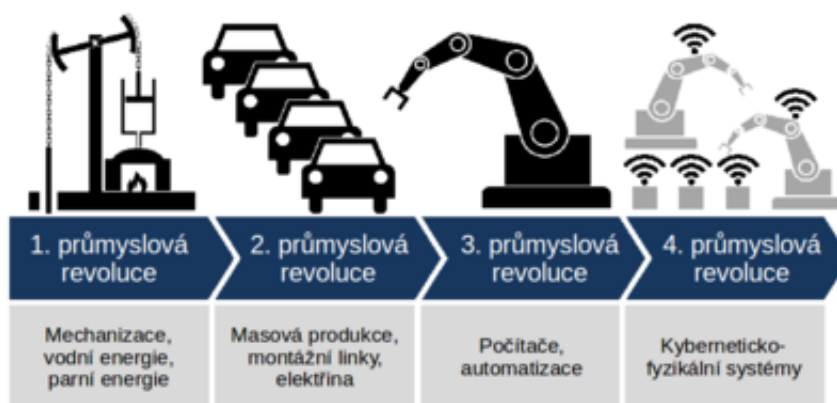
Digitální dvojče (obr.4.1) lze využít nejen pro obráběcí stroje, ale také pro celou výrobní linku, robotické pracoviště a v další aplikace. Po vytvoření digitálního konceptu výrobního zařízení, vzniknou podrobné 3D podklady jinak řečeno digitální dvojče. Na něm se virtuálně odzkouší mechanické chování stroje a vyhodnotí se možné problémy a kolize, automatizace jednotlivých digitálních procesů, definice senzorů, definice přepravy materiálu apod. Následně se digitální mechanický model propojí s reálným nebo virtuálním systémem. Je možné ověřit funkčnost systému, ještě před fyzickým sestavením celého systému. Reálné zprovoznění je tedy až o 70% rychlejší, bez závažnějších problémů, které, už byly vyřešeny během virtuální tvorby. [32], [33], [34]



Obr.4.1 Digitální dvojče v závodu Škoda auto [32].

4.2 Průmysl 4.0

Pojem „Industrie 4.0“ se poprvé objevil na průmyslovém veletrhu Hannover Messe již v roce 2011. Do podvědomí širší veřejnosti se dostal v roce 2016 na světovém ekonomickém fóru v Davosu, které neslo moto „Mastering the Fourth Industrial revolution“ [35], tedy jak zvládnout čtvrtou průmyslovou revoluci, i když z technického hlediska se jedná spíše o jakousi evoluci (obr.4.2). Směry dalšího vývoje Průmyslu 4.0 jsou v oblastech: Systémová integrace, analýza velkých dat (Big Data), autonomní roboti, cloudové úložiště a výpočty, aditivní výroba, rozšířená realita až po zcela nové technologie. Celkové propojení všech oblastí do jednoho celku, kdy takto zcela digitalizovaný a automatizovaný systém, efektivně zlepší všechny procesy od návrhu výroby, řízení a logistiku až po zákaznickou podporu. Pro Českou republiku má velký význam na zvládnutí tohoto konceptu získání výhody nad asijskými low cost výrobci, kteří jsou konkurenční hrozbou pro český průmysl. Hovořit lze zejména o poli kvality výrobků, zakázkové výrobě a dodací lhůtě. [36], [37], [38]



Obr. 4.2 Diagram znázorňující čtyři industriální revoluce včetně průmyslu 4.0 [38].

Výhody průmyslu 4.0 předvádí výrobní buňka 4.0 (obr.4.3) zprovozněná společností INTEMAC. Tento výrobní celek propojuje obráběcí stroj, robot a měřicí pracoviště, jednotlivé prvky spolu komunikují, ale zároveň je snadné celý systém překonfigurovat, což je podstatné u malosériové výroby. Stroj by měl umět komunikovat i s podnikovými informačními systémy, což je náročné na objem zpracovaných dat. Německé sdružení výrobců obráběcích strojů – VDW vyvíjí otevřené rozhraní, umožňující připojit obráběcí stroje k systémům informačních technologií vyšší úrovně. Koncept Průmyslu 4.0 zmiňuje pojem globální síť, ovšem ten bude možné plnohodnotně využít za předpokladu, že data se budou předávat přes standardní rozhraní v rámci celého procesu. Proto jsou otevřené standardy rozhodujícím faktorem úspěchu. Celý koncept těží z propojení celého procesu od dodavatele až po výrobce. [39], [40]



Obr.4.3 Výrobní buňka 4.0 [39].

5 IMPLEMENTACE STROJE DO PROSTŘEDÍ VERICUT

5.1 Představení konkrétního obráběcího centra

Ověřování bude probíhat na tříosém vertikálním obráběcím centru modelové řady MV 2 od společnosti Quaser (obr.5.1). Model MV214 se řadí do kategorie velkých strojů a to díky své velikosti a zatížení stolu 2000 kg. Konstrukce základního skeletu stroje zajišťuje velmi dobrou tuhost pro obrábění. Stůl a vřeteno se pohybují po lineárních vedeních. Zásobník má kapacitu až pro 60 nástrojů, zaměřovací sonda má svou pozici, což může mít negativní vliv na čas obrábění. Maximální rozsah pojezdů udávaných rozjezdem v ose X/Y/Z je 1524/700/610 mm. Velikost stolu je 1700x700 mm. Řízení stroje zajišťuje řídicí systém Heidenhain iTNC 640.



Obr.5.1 Obráběcí centrum Quaser MV214

5.2 Kontrola skutečných rozměrů stroje

Byla provedena kontrola skutečných rozměrů stroje s dodanou technickou dokumentací, pro ověření správnosti hodnot, v některých případech se hodnoty udávané výrobcem liší, nebo může být dodána dokumentace k jinému typu stroje. V případě zadání nesprávných hodnot, může simulace předpovídat bezkolizní průběh, ovšem v průběhu skutečné výroby, už kolize nastat může. Měření proběhlo pomocí měřicího ramena Romer absolute arm 7525 (obr.5.2), které bylo připojeno na systém PolyWorks. Do systému se nahrál 3D model stroje sestavený z hodnot udávaných výrobcem. Následná kontrola ukázala minimální odchylky od skutečných rozměrů a technické dokumentace stroje. Výsledek celého měření je zaznamenán v protokolu měření (viz příloha 1).



Obr.5.2 Měřicí rameno upevněné v měřeném stroji.

5.3 CAD model stroje

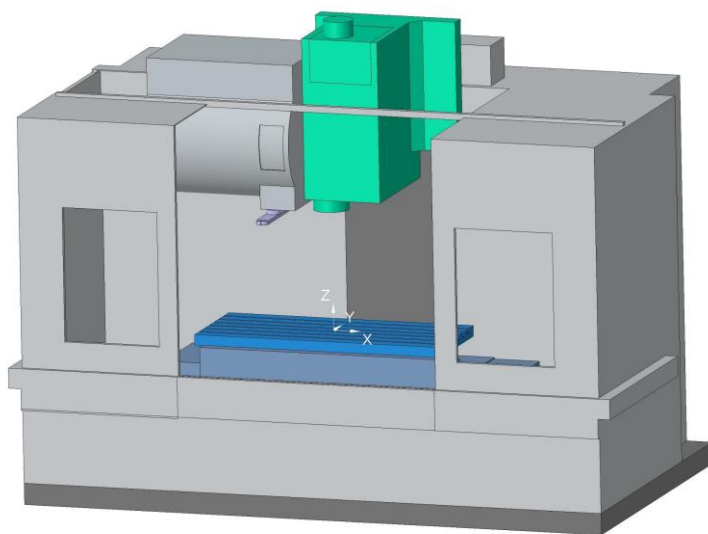
Vytvoření 3D modelu (obr.5.2) stroje proběhlo v softwaru Creo Parametric, který je vyvíjen společností PTC. Poskytuje sadu propojených aplikací, sestavených dle potřeby zákazníka, v tomto případě škálovatelný parametrický modelář. Kvalitní asociativita zajišťuje, že jakákoliv změna se projeví všude.

Modelování bylo provedeno převážně v prostředí skicáře, která je používána pro práci u většiny CAD systémů. Způsob práce byl následovný:

- Nejprve proběhlo vytvoření 2D náčrtu umístěného do zvolené roviny, nejčastěji jedna z rovin hlavního souřadného systému.
- Bylo vytvořeno objemové těleso pomocí prvku vysunutí, tažení, rotace, zaoblení a sražení hran, ...
- Vytvořený prvek je zařazen na konec stromové historie s možností zpětné editace

Model musí popisovat mechanickou stránku stroje a hranice pro vymezení prostoru pohybujících se celků, následně se definují rozsahy pohybů pro jednotlivé osy. Celý pracovní prostor vymezuje ochranný kryt stroje. Na základě těchto skutečností není nutné vytvářet model se všemi detaily, postačí přibližné tvary klíčových komponent, ale při zachování přesných rozměrů. Kompletně důvěrný model by tedy nepřinesl žádné praktické poznatky, ba naopak by zvedl nároky na použitou výpočetní techniku. Postupně jsou vytvořeny jednotlivé prvky stroje počínaje základnou stroje. Následně základní prvky pro pohyb stroje: pracovní deska stolu s „T“ drážkami, spodní část stolu pro lineární pohyb v ose Y a celý blok včetně vřetena. Zásobník nástrojů a rameno pro jejich automatickou výměnu.

Dalším zásadním krokem bylo vztažení všech komponent k jednomu souřadnému systému, v tomto případě na střed vrchní plochy pracovního stolu. Vynechání tohoto kroku by zásadně ztížilo další práci s virtuálním strojem, zejména při určení kinematiky.



Obr.5.2 Sestava stroje vytvořená v prostředí Creo Parametric.

5.4 Sestavení a kinematika stroje v prostředí Vericut

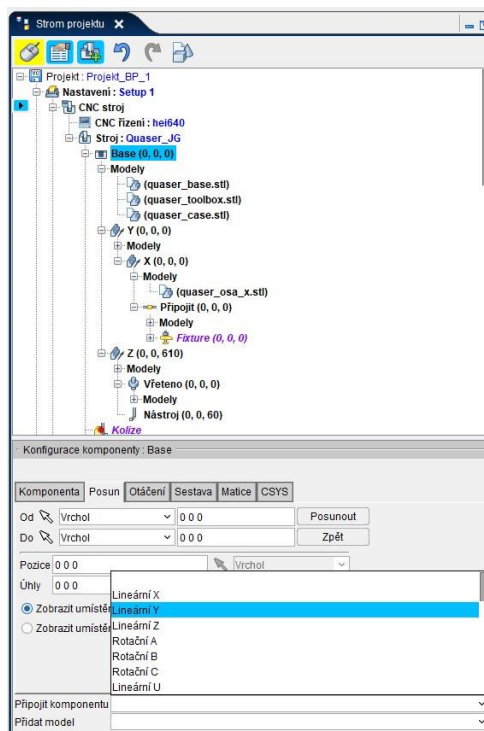
Přenesení dat z Creo do Vericut je možné použít neutrální formát STEP nebo IGES, popřípadě STL. V první řadě je nutné vytvořit nový projekt. Do stromu projektu se přidá „Nastavení“ (lépe vystihující výrazem by mohlo být upnutí nebo ustavení), pod kterým se skrývají všechny náležitosti pro konkrétní nastavení. V jednom projektu je možné mít více těchto nastavení, pokud je součást potřeba během obrábění upnout do jiné pozice nebo pro případ, kdy se součást obrábí na více odlišných strojích, každé nastavení může mít svůj vlastní polotovar, NC program nebo stroj v rámci jednoho projektu.

Sestavení virtuálního stroje probíhá importováním jednotlivých komponent na jeden souřadný systém. Zde se s výhodou využilo vhodného uložení celého stroje. Ve stromě projektu (obr.5.3) jsou uspořádány jednotlivé komponenty, kdy prvky pro osu X jsou závislé na prvcích osy Y, které jsou na stejné úrovni s prvky osy Z. Base – základna obsahuje nepohyblivé komponenty stroje, podstavec, ochranný kryt a zásobník nástrojů. Uspořádání odpovídá závislostem reálného stroje. Stroj lze uložit ve formátu MCH a používat jako šablonu v dalších projektech.

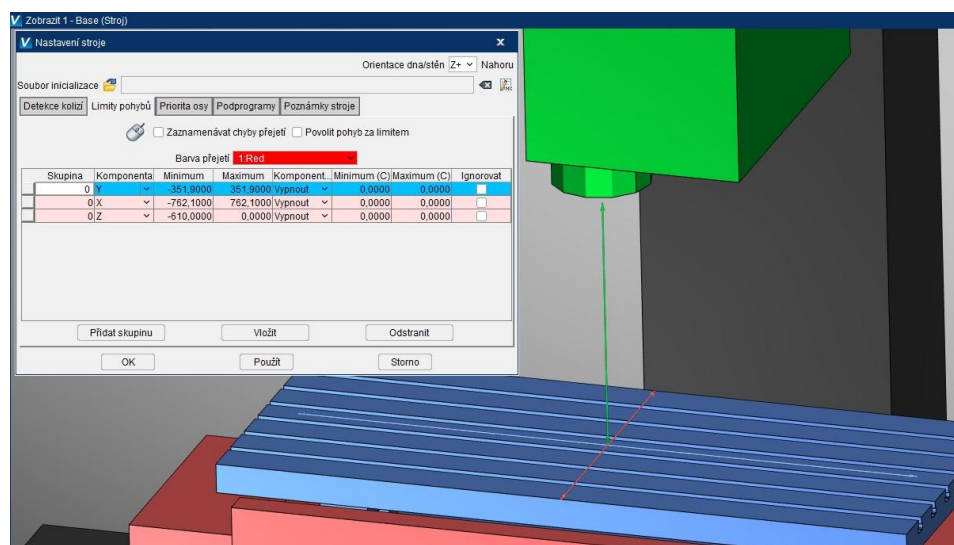
Pod záložkou „Stroj/CNC řízení“ se nastaví limity pohybů stroje (obr.5.4). Zadáním maximálních a minimálních hodnot pro jednotlivé komponenty:

- X $\pm 762,1$ mm
- Y $\pm 352,9$ mm
- Z $+610$ mm

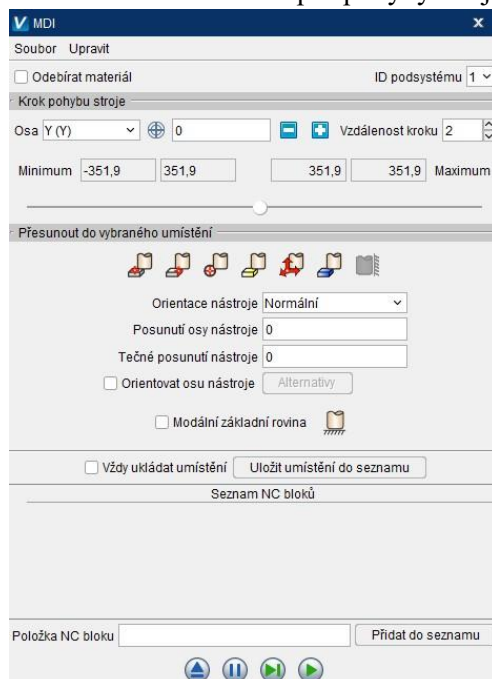
Ověřené hodnoty rozjezdů stroje se liší pouze v desetínách milimetru od hodnot udávaných výrobcem, odchylka tedy nebyla uvažována. Pomocí funkce MDI (obr.5.5) lze pohyby stroje vizuálně zkontrolovat.



Obr.5.3 Strom projektu.



Obr.5.4 Nastavení limitů pro pohyby stroje.



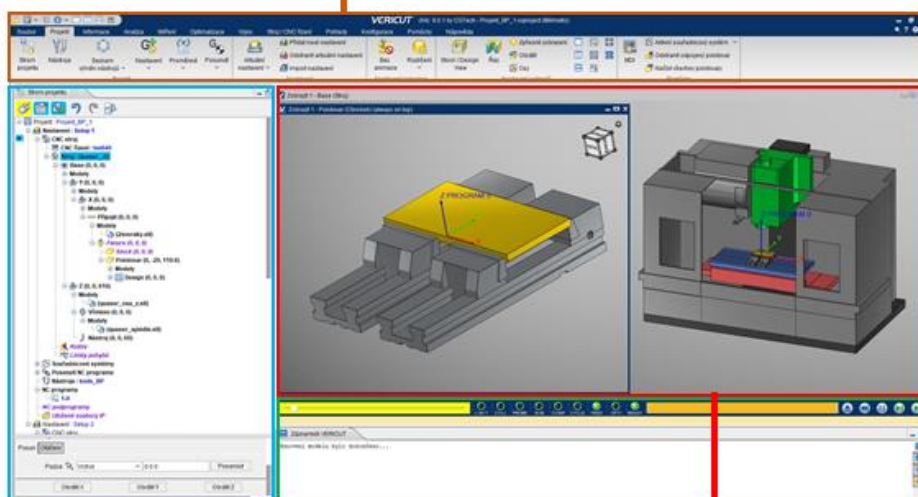
Obr.5.5 Řídící panel stroje MDI.

5.5 Řídící systém stroje

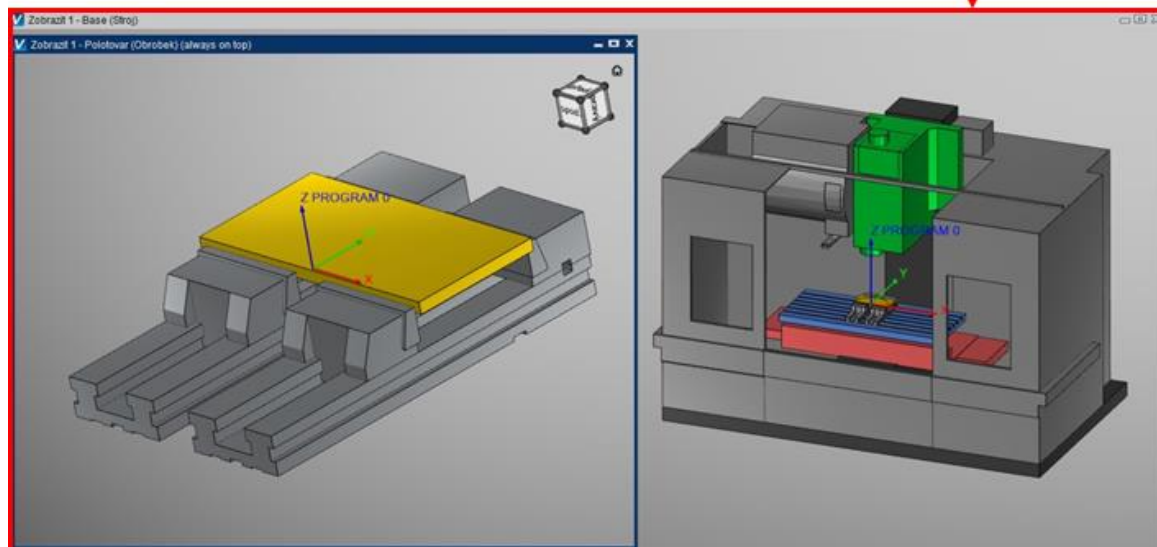
Zvolené obráběcí centrum je řízeno systémem Heidenhain iTNC 640, který je jedním z nepoužívanějších pro CNC stroje, proto nebylo nutné vytvářet nový nebo jej modifikovat. Software nabízí knihovnu běžných řídicích systémů a stačilo ho pouze vložit do stromu projektu. Obecně má řídicí systém za úkol překládat příkazy z NC kódu a následně je provádět na stroji, jsou to zejména pohyby stroje, cykly a funkce. Stroj je následně připraven k simulaci (obr.5.6).



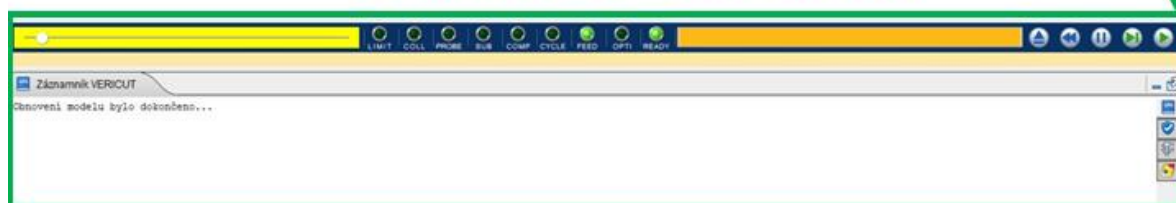
Karta záložek



Strom projektu



Náhledová okna – obrobek, stroj



Panel simulace a záznamník

Obr.5.6 Nastavené prostředí systému Vericut.

6 VIRTUÁLNÍ OBRÁBĚNÍ

6.1 Popis obráběné součásti

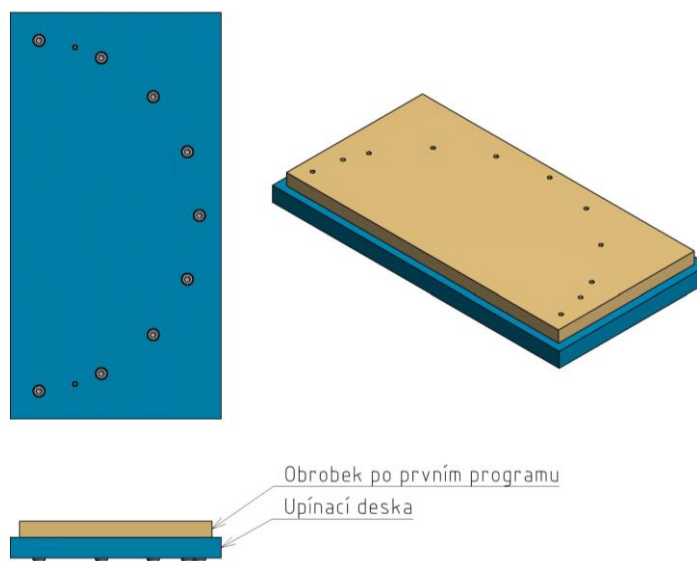
Pro simulaci byla vybrána součást (obr.6.1). K její výrobě jsou použity nejčastěji používané obráběcí strategie. Díl slouží jako polovina tvarující čelisti v automatizované lince na výrobu segmentových kolen. Součást je konstruována bez výrazných tvarových složitostí a geometrických tolerancí. Předepsána je pouze celková drsnost povrchu Ra 3,2 a té lze dosáhnout běžným frézováním. Na součásti se nachází dvě technologické díry $\varnothing 5H7$ pro upnutí do přípravku a devět děr se závitem M6 (viz příloha 2) Pro výrobu součásti byl vybrán polotovár představující desku o výšce 16 mm, šířce 185 mm, uříznuté pomocí pásové pily na délku 370 mm. Vzhledem k tomu, že vyráběná součást bude použita pouze jako zkušební, při odladování stroje, byla zvolena je slitina hliníku EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7).



Obr.7.1 CAD model součásti.

6.2 Upnutí součásti

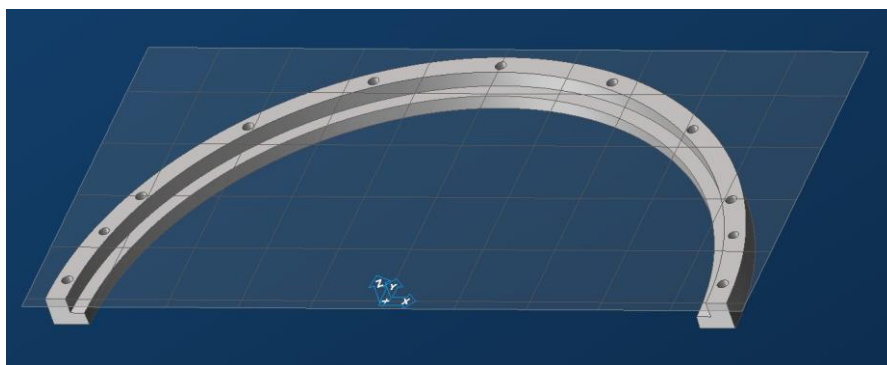
Součást byla obrobená na dvě upnutí, za současného použití dvou strojních svěráků. Během prvního upnutí je polotovár upnut klasickým způsobem do svěráku. Z důvodu výroby většího počtu kusů, byl zhotoven přípravek pro snadnou a přesnou výměnu obrobků. Jednoduchý přípravek, který upne obrobek šrouby a zajistí správnou polohu pomocí dvou kolíků (obr.6.2).



Obr.6.2 Schéma přípravku s upnutým obrobkem.

6.3 Návrh obráběcích strategií

Programy pro CNC stroj jsou tvořeny pomocí softwaru GibbsCAM, který je vyvíjen společností 3D Systems. Po zvolení nulového bodu na střed půlkruhové součásti (obr.6.3) následovalo definování polotovaru zvětšeného o přídavky pro obrábění a určení bezpečných rovin pro nájezdy a výjezdy nástrojů. Volba nástrojů zohledňovala druh obráběného materiálu a danou strategii. Technologické podmínky jsou u všech následujících operací voleny v závislosti na parametry nástroje a materiál obráběné součásti a jsou zaznamenány v technologickém postupu (viz příloha 3). Posloupnost prováděných operací je vyznačena v tabulce 6.1.



Obr. 7.3 Obráběná součást a nulový bod NC programu.

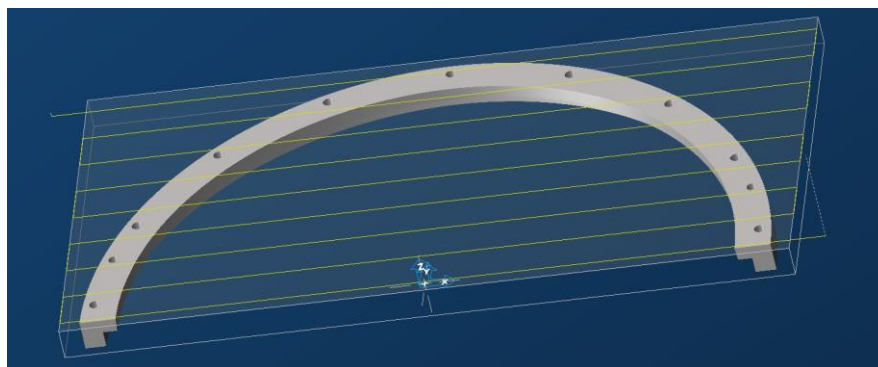
Tab.6.1.a Posloupnost operací – program první.

| První program | | |
|----------------------|-----------------------------|----------------|
| Pořadí operace | Popis operace | Číslo nástroje |
| 1. | Čelní frézování – dokončení | T17 |
| 2. | Předvrtání děr | T130 |
| 3. | Vrtání a vyhrubování děr | T180, T201 |
| 4. | Vrtání děr a řezání závitů | T303, T313 |
| 5. | Gravírování | T10 |

Tab.6.1.b Posloupnost operací – program druhý.

| Druhý program | | |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| Pořadí operace | Popis operace | Číslo nástroje |
| 1. | Frézování – hrubování | T48 |
| 2. | Frézování – hrubování | T48 |
| 3. | Frézování – dokončení | T48 |
| 4. | Frézování – dokončení | T48 |
| 5. | Frézování – dokončení | T76 |
| 6. | Sražení hran | T92 |

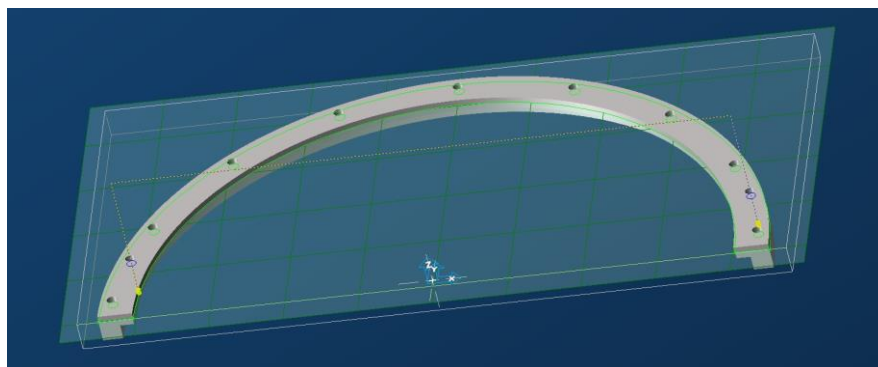
Čelní frézování bývá běžně požívané jako první strategie při frézování (obr.6.4). Krok v ose Z nastavený na 1 mm je dostatečný, jelikož předepsaná drsnost součásti není příliš veliká. Pro tuto strategii byla zvolena čelní fréza s břitovými destičkami o průměru 25 mm.



Obr.6.4 První operace.

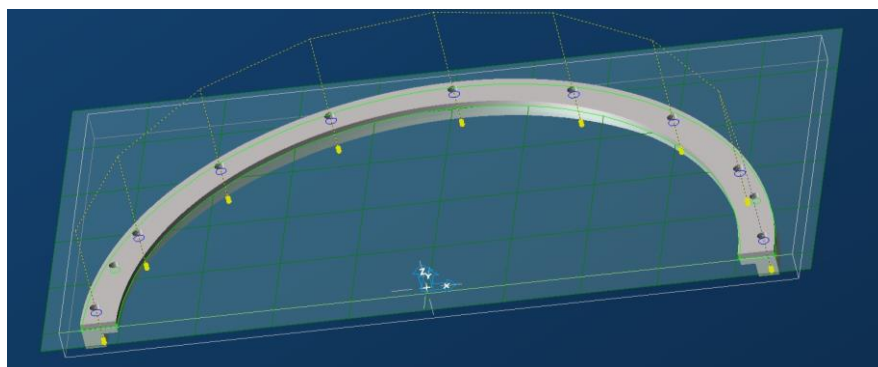
Druhá operace představovala v první řadě předvrtání technologických a poté funkčních děr, za použití navrtávacího nástroje z rychlořezné oceli o průměru 12 mm.

Třetí spojená operace (obr.6.5), kde proběhlo vyvrtání technologických děr pro kolíky monolitním karbidovým vrtákem průměru 4,9 mm a následně jejich vystružení pomocí výstružníku 5H7.



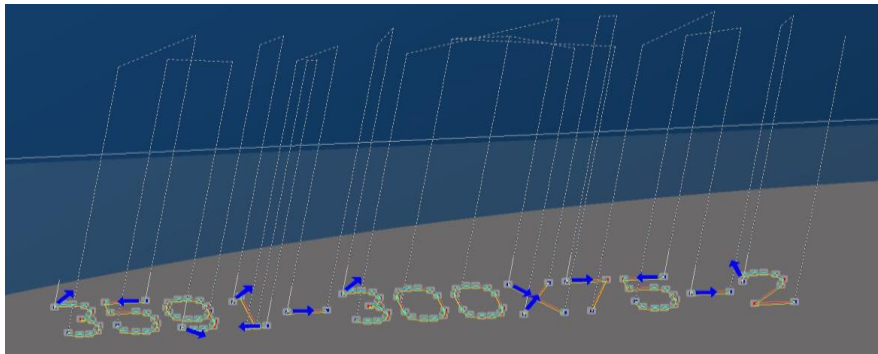
Obr.6.5 Třetí spojená operace.

Ve čtvrté spojené operaci (obr.6.6) byly vyvrtány funkční díry vrtákem o průměru 5,55 mm a pro řezání závitů byl použit válcovací závitník M6.



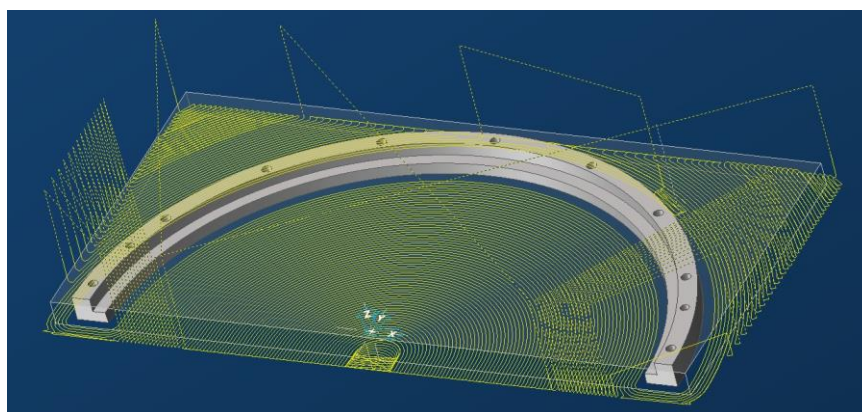
Obr.6.6 Čtvrtá spojená operace.

Pátá operace (obr.6.7) a zároveň poslední pro první program, při které se gravírovalo označení součásti do hloubky 0,15 mm, za použití gravírovacího hrotu.



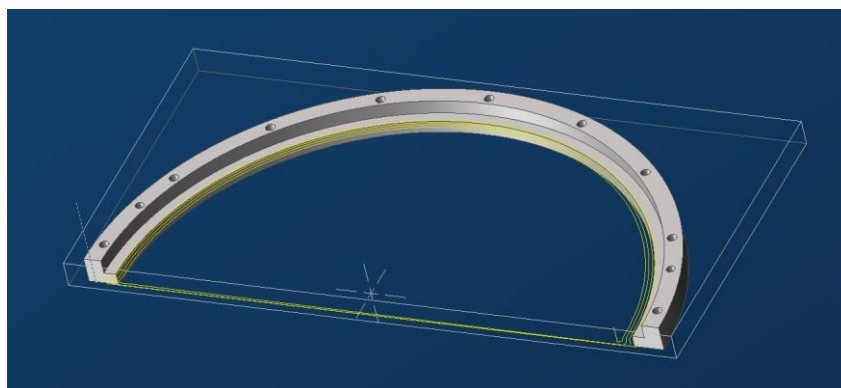
Obr.6.7 Pátá operace.

První operace (obr.6.8) v druhém programu zajistila technologie pro vysokorychlostní hrubování VoluMill při které je nástroj (Monolitní karbidová fréza o průměru 12 mm) v záběru téměř celou svojí funkční částí. Hrubování proběhlo během jednoho kroku do hloubky 16 mm a proto se při upnutí prvního obrobku do přípravku odebere malá vrstva materiálu upínací desky, u dalších součástí již není nutné se touto skutečností zabývat.



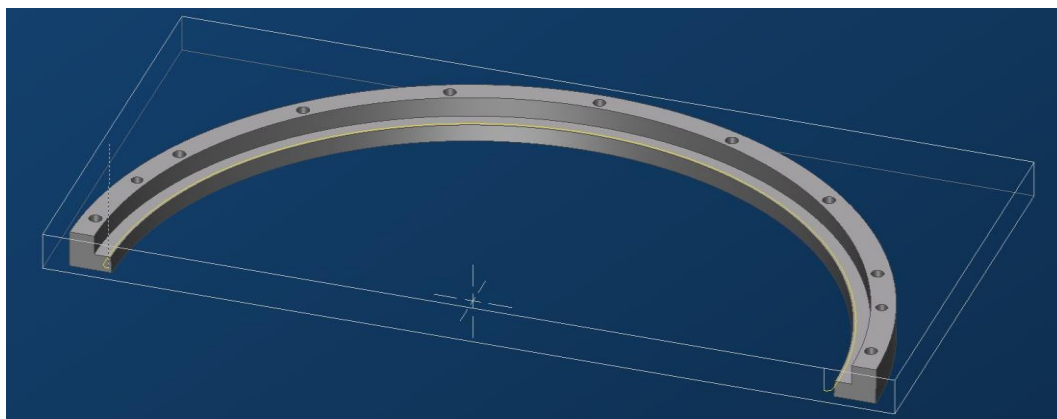
Obr.6.8 První operace.

Během druhé operace (obr.6.9) byla použita technologie VoluMill, tentokrát pro vyfrézování osazení na vnitřním průměru součásti. Nástroj zůstává stejný jako u předchozí operace.

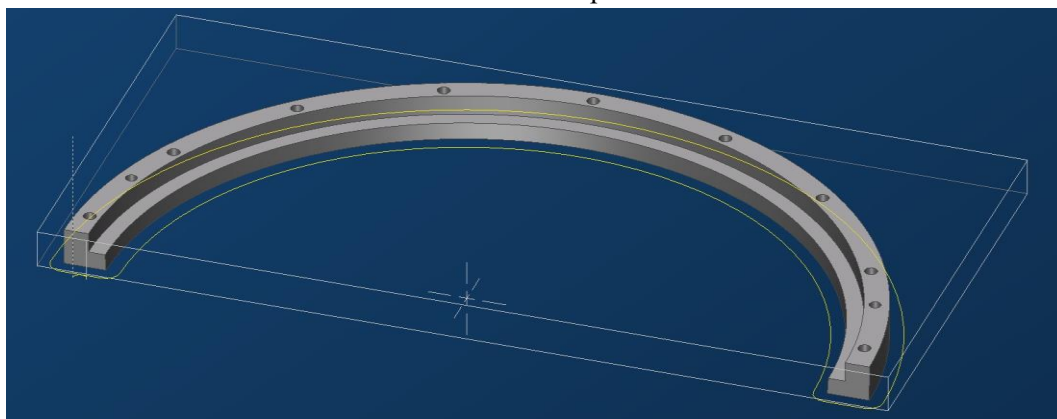


Obr.6.9 Druhá operace.

Ve třetí a čtvrté operaci (obr.6.10, obr.7.11) proběhlo dokončení, kdy stále stejný nástroj projede osazení sníženým posuvem do hloubky 8,5 mm a poté dokončil vnější obrys součásti.

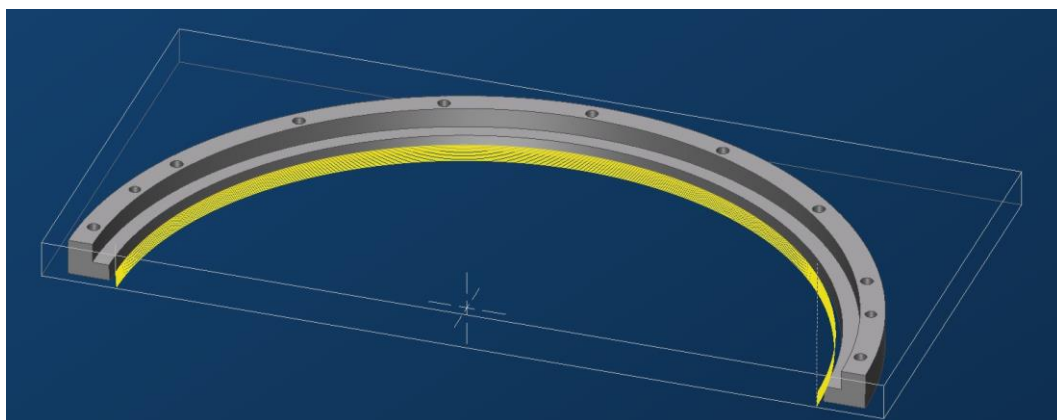


Obr.6.10 Třetí operace.



Obr.6.11 Čtvrtá operace.

Při páté operaci (obr.6.12) proběhla výměna nástroje, kterým je kulová fréza o průměru 6 mm. Frézovala se šikmá plocha vnitřního obrysu, která byla skloněná o 4° . Krok je nastaven na 0,4 mm.



Obr.6.12 Pátá operace.

V šesté operaci, byly srážecí frézou průměru 12 mm, sraženy hrany o 2,5 mm.

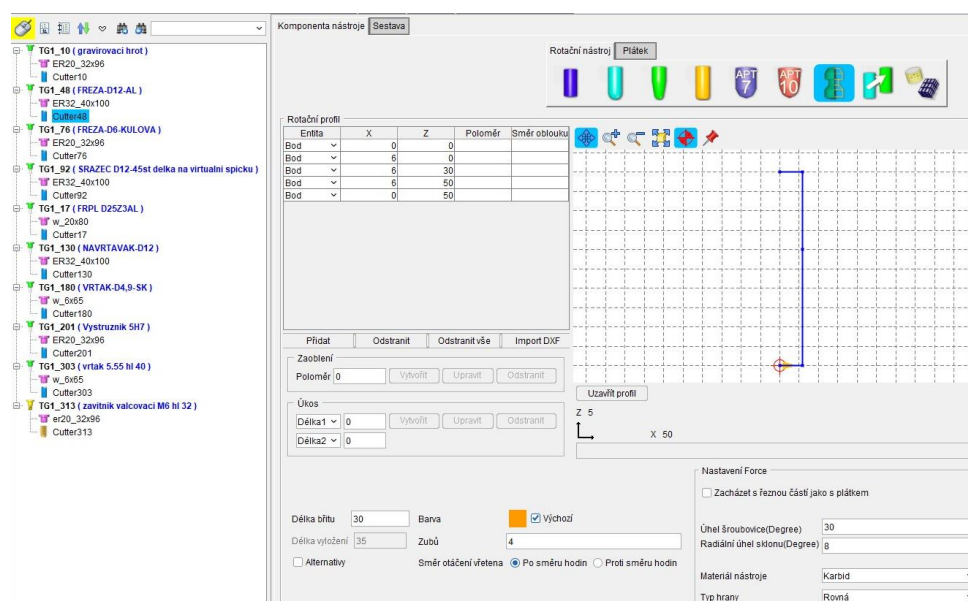
7 SIMULACE A REÁLNÉ OBRÁBĚNÍ

7.1 Sestavení knihovny nástrojů

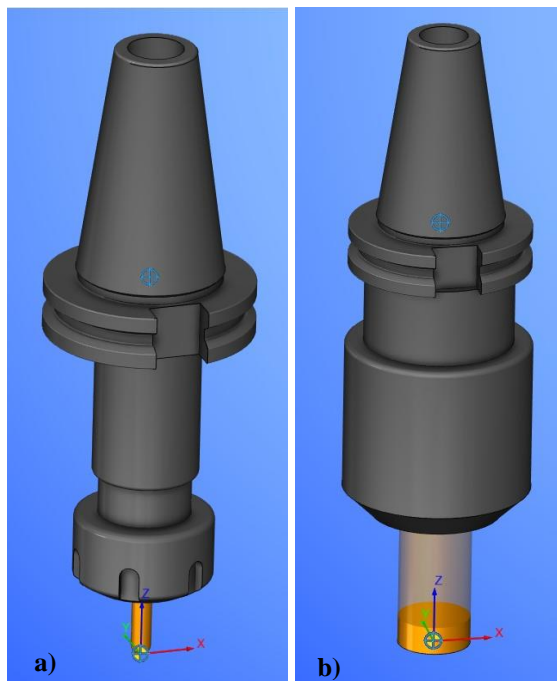
Po sestavení stroje, upnutí polotovaru do svěráku a importování přeloženého programu se vytvoří sada používaných nástrojů a upínačů. Každý nástroj má své ID, pod kterým ho následně NC program volá při obrábění. Nástroje i upínače lze definovat pomocí předdefinovaných tvarů, nejčastěji používaných nástrojů, software také disponuje jednoduchým skicářem na bázi rotace, kterým se dají nástroje i upínače vymodelovat. Poslední variantou je import externího modelu v některém z běžně používaných formátů: (STEP, STL, IGS...). V tomto případě byly nástroje vytvořeny ve skicáři (obr.7.1) a upínače vloženy z firemní databáze. Všechny použité upínače mají upínací systém ISO – metrický strmý kužel na upínacím trnu. Důležitým krokem je určení řízeného bodu, který se nastaví na špičku nástroje a definování upínacího bodu (obr.7.2). Seznam nástrojů s upínači je uveden v tabulce číslo 7.1.

Tab.7.1 Seznam nástrojů.

| Číslo nástroje | Název nástroje | Průměr nástroje [mm] | Materiál | Upínač [ISO 40] |
|----------------|------------------|----------------------|----------|-----------------|
| T10 | Gravírovací hrot | 6 | SK N15 | ER20 32x96 |
| T17 | Čelní fréza | 25 | SK N20 | Weldon 20x80 |
| T48 | Válcová fréza | 12 | SK N20 | ER32 40x100 |
| T76 | Kulová fréza | 6 | SK N20 | ER20 32x96 |
| T92 | Srážec hran | 12 | SK N15 | ER32 40x100 |
| T130 | Středící vrták | 12 | HSS | ER32 40x100 |
| T180 | Vrták | 4,9 | SK N20 | Weldon 6x65 |
| T201 | Výstružník | 5 | SK N20 | ER20 32x96 |
| T303 | Vrták | 5,55 | SK N15 | Weldon 6x65 |
| T313 | Závitník tvářecí | M6 | SK N20 | ER20 32x96 |



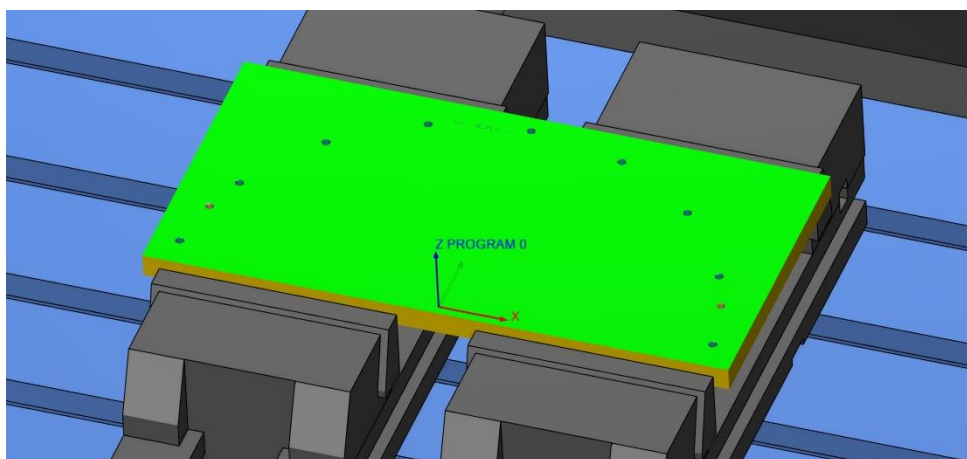
Obr.7.1 Seznam vytvořených nástrojů a skicář v prostředí vericut.



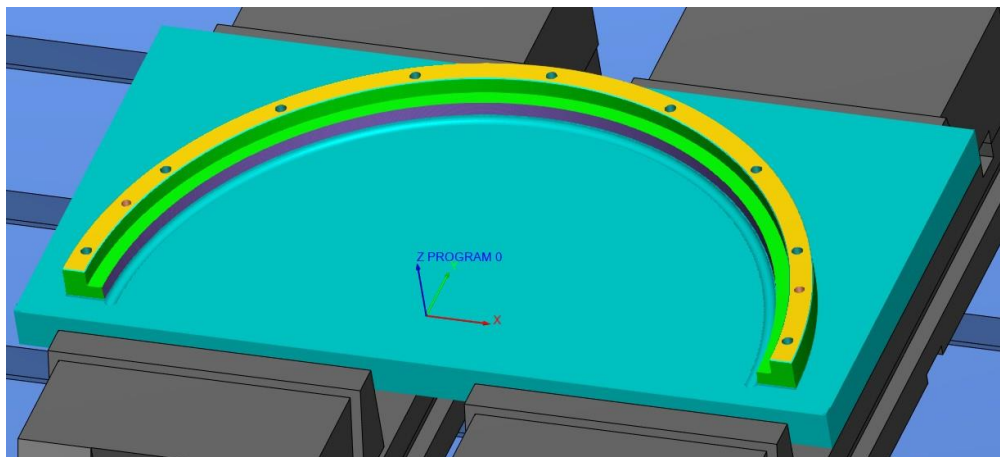
Obr.7.2 Nástroje: a) v kleštinovém upínači, b) v upínači s weldon upínáním.

7.2 Simulace programu

Program během simulace automaticky kontroluje, zda-li nedochází ke kolizi mezi vloženými komponenty, zejména vřetenem, upínkami a stolem. Kontroluje i sestavu upínač – nástroj – obrobek, aby nedošlo k najetí nástroje do obrobku rychloposuvem nebo bez aktivované funkce M3 zapínající otáčky vřetená (obr.7.3, obr.7.4).



Obr.7.3 Dokončený díl po simulaci prvního programu.



Obr.7.4 Dokončený díl po simulaci druhého programu.

7.3 Vyhodnocení simulace

Systém nedetekoval žádné kolize v průběhu simulace ani nenahlásil žádné chyby v záznamníku. V průběhu simulace bylo možné měnit rychlost animace a natáčet sestavu v prostoru, pro lepší vizuální podmínky, zároveň se dá program procházet krok po kroku. V případě, že by byla chyba detekována bude vyznačena v konkrétním řádku a kód může být obratem přepsán.

To je výhodné v případě, že systém detekuje nějakou chybu. Vyznačí ji na konkrétním řádku, kde je možné kód obratem přepsat.

Výše uvedené kroky jako je sestavení stroje, vytvoření knihovny nástrojů a nastavení dalších parametrů, zde bylo popsáno pro názorné popsání celého procesu. V běžné praxi se používají již předpřipravené šablony nebo zabudovaný interface v používaném CAD/CAM systému. Software GibbsCAM podporuje interface pro Vericut, postup touto cestou byl také ověřen. Došlo se ke stejnému výsledku, ale znatelně rychlejší cestou.

7.4 Reálné obrábění

NC program byl verifikován a po předání dat se zahájí fyzická výroba. Operátor upne polotovár do dvou strojních svěráků a načte první program na ovládacím panelu. Po dokončení prvního programu bude provedena kontrola výšky obrobku pomocí digitálního mikrometru. Obrobek zajištěný kolíky a připevněný šrouby do přípravku bude upnut opět do svěráků. Všechny operace mají aktivované chlazení řeznou kapalinou.

Čelní frézování (obr.7.5) – je provedeno pouze jedním krokem, to má vliv na jakost obrobenej plochy ($R_a 3,2$), ovšem je dostačující s ohledem na funkci součásti.



Obr.7.5 Frézování čela – první program.

Hrubování – technologie VoluMill vysokorychlostním hrubováním odebere materiál na jeden krok (obr.7.6). Řezná rychlost (265 m/min) je snížena, protože byl brán ohled na tvar součásti a možnosti její deformace při hrubování vnitřní kapsy.



Obr.7.6 Hrubování – druhý program.

Dokončovací operace – Odebráním přídavku se dokončí osazení a vnější kontury součásti. Šikmá funkční plocha (obr.7.7) se vyfrézuje kulovou frézou při patřičných řezných podmínkách. V posledním kroku se srazí hrany u čelní plochy o 2,5 mm, tato plocha není nijak obrobena a její jakost povrchu je dána pouze jakostí polotovaru.



Obr.7.7 Frézování kulovou frézou – druhý program.

7.5 Odchyly simulace a reálného obrábění

Reálná výroba součásti potvrdila průběh simulace. Proces obrábění proběhl podle očekávání a neobjevily se žádné chyby ani kolize, ovšem projevila se časová nepřesnost času simulace a reálného obrábění. Vericut vytváří po každé simulaci report, v kterém je výpis časů pro jednotlivé operace. Časy skutečného obrábění byly změřeny manuálně pomocí stopek. Záznamy jsou zaneseny společně s výsledky z CAM systému do tabulek 7.2, 7.3 pro první a druhý program.

Tab.7.2 První program.

| Číslo operace | GibbsCAM | Vericut | CNC |
|--|------------|----------------|----------------|
| | [hh:mm:ss] | | |
| 1. | 0:01:21 | 0:01:33 | 0:01:39 |
| 2. | 0:00:45 | 0:00:56 | 0:01:01 |
| 3. | 0:00:47 | 0:01:09 | 0:01:24 |
| 4. | 0:02:09 | 0:02:37 | 0:02:58 |
| 5. | 0:00:23 | 0:00:36 | 0:00:40 |
| Celkový čas | 0:05:25 | 0:06:51 | 0:07:42 |
| Rozdíl mezi simulací Vericut a reálným obráběním | | 0:00:51 | |

Tab.7.3 Druhý program.

| Číslo operace | GibbsCAM | Vericut | CNC |
|--|------------|----------------|----------------|
| | [hh:mm:ss] | | |
| 1. | 0:08:04 | 0:09:45 | 0:10:47 |
| 2. | 0:00:33 | 0:00:42 | 0:00:58 |
| 3. | 0:00:27 | 0:00:31 | 0:00:34 |
| 4. | 0:00:35 | 0:00:44 | 0:01:01 |
| 5. | 0:02:56 | 0:03:08 | 0:03:15 |
| 6. | 0:00:31 | 0:00:47 | 0:00:52 |
| Celkový čas | 0:13:06 | 0:15:37 | 0:17:27 |
| Rozdíl mezi simulací Vericut a reálným obráběním | | 0:01:50 | |

Lze předpokládat, že rozdíly v zaznamenaných čase se liší zejména dynamikou stroje. V GibbsCAM jsou časy vypočteny pouze na základě délky drah nástroje a dynamika stroje se zde neprojevuje. Jedná se pouze o vytvoření obráběcích strategií, volbu nástroje a definování technologických podmínek. Systém Vericut umožňuje zohlednění dynamiky, pro jednotlivé komponenty stroje, lze přiřadit hodnoty zrychlení a zpomalení. Zrychlení pro zvolený stroj bylo vyčteno v technické specifikaci, ovšem zde je uvedena pouze obecná hodnota zrychlení pro celý stroj, ne hodnoty pro jednotlivé komponenty. Nadále však zůstává malá časová odchylka, ta je způsobena zadáním pouze obecné hodnoty zrychlení. Dalším negativním faktorem může být neschopnost pohonů stroje dosažení předepsaných zrychlení a rychlostí posuvů, které se průběhu času snižují opotřebením.

Praktický experiment ukázal, že reálný čas obrábění na CNC stroji byl 7 minut a 42 vteřin pro první program a 17 minut a 27 vteřin pro druhý program. Predikované časy systémem GibbCAM jsou kratší o 29,6 % pro první program a o 24,9 % pro druhý program. Při implementaci systému Vericut se odchylka snížila na 11 % pro první program a během druhého programu na 10,5 %. Celková časová odchylka mezi simulací a reálným obráběním byla z původních 26,4 % snížena na 10,7 %.

DISKUSE

Navrhovaným řešením je experiment, při kterém se zjistí dynamické vlastnosti stroje. Provádět opakované pohyby stroje pro jednotlivé osy a porovnávat odchylky se simulací. Následně jezdit strojem po kruhové dráze v jednotlivých rovinách (YZ, ZX, ...) a opět porovnávat simulací. Získané parametry se doplní do systému Vericut a proběhne další ověřovací obrábění. Následně bude možné ověřit, jestli dynamika stroje měla opravdu tak zásadní vliv na odchylky mezi simulací a skutečností.

Dalším návrhem je řešení, kdy se při experimentu použije sofistikovanějších měřících sond – akcelerometr (např. od firmy Renishaw nebo Kistler). Sonda se připevní na stůl stroje, kterým se začnou provádět pohyby, změří se hodnoty akcelerace a decelerace. Z tohoto měření se už dají získat přesné dynamické hodnoty stroje. Získaná data se opět zadají do systému Vericut a bude možné provést přesnější simulaci.

Praktická část byla realizována na tříosém obráběcím centru. Ovšem opravdový potenciál verifikačních systémů se projeví při použití víceosých center nebo hybridních technologií a při použití dalších verifikačních funkcí. Konkrétně systém Vericut nabízí i další verifikační moduly – např. Vericut Force, která pomocí simulace a analýzy zatížení obráběcího nástroje dokáže eliminovat extrémní zatížení a zrychlení nástroje. Výsledkem je delší životnost nástrojů a časová úspora. Funkce OptiPath zase optimalizuje dráhy nástroje, dle objemu odebraného materiálu. Důkladnější představení systému nebylo možné z důvodu absence potřebných licencí.

ZÁVĚR

Praktická část prokázala odchylku od simulovaného času obrábění v prostředí CAM oproti systému Vericut a také skutečným hodnotám. Konkrétně se časy lišili o 17,6 % při porovnání systému GibbsCAM / Vericut, o 26,4 procent ve srovnání CAM / skutečné hodnoty a o 10,7 % ve srovnání Vericut / skutečné hodnoty. Jako efektivnější pro stanovení předpokládaných výrobních času se z uvedených jeví Vericut. Odchylka 10,7 % která vznikla při predikci systému Vericut pravděpodobně souvisí s potřebou zpřesnění nastavených hodnot popisující kinematiku a dynamiku stroje v prostředí Vericut. Zpřesnit tyto hodnoty by bylo možné například využitím přesné měřicí aparatury využívající vysokofrekvenčního záznamu akceleračních a deceleračních hodnot a individuálního proměření stroje proměření v jednotlivých osách, případně při kombinovaných pohybech současně v rovině XY, YZ a XZ. Naměřené hodnoty by poskytly vhodný podklad pro zpřesnění virtuálního modelu obráběcího stroje a odchylka predikovaných a reálných časů by se snížila.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 2014. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015, 240 s. : il. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [3] GY, Zhao, Zhuang BY, Zheng GM a Zhao YG. Cross-coupling control method for five-axis computer numerical control machine with dual rotary tables. In: *Researchgate.net* [online]. 2017 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320079855_Cross-coupling_control_method_for_five-axis_computer_numerical_control_machine_with_dual_rotary_tables
- [4] Frézování. *KUKA* [online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/procesn%C3%AD-technologie/fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD>
- [5] Can a Robot Outperform a CNC Machine for Robot Machining?. *RoboDK* [online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/robot-machining-vs-cnc/>
- [6] ZHU, Zerun, Xiaowei TANG, Chen CHEN, Fangyu PENG, Rong YAN, Lin ZHOU, Zepeng LI a Jiawei WU. *High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends, Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2021 [cit. 2021-04-12]. ISSN 1000-9361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120305987>
- [7] Robotics at the Grand Banks Factory. In: *Grand Banks* [online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://grandbanks.com/2018/12/robotics-at-the-grand-banks-factory/>
- [8] LARSSON, Jan. Aditivní a hybridní výroba 3D tiskem. *MM spektrum* [online]. c2001-2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-a-hybridni-vyroba-3d-tiskem>
- [9] Hybridní výroba spojuje 3D tisk s přesným obráběním. *Strojirenství CZ* [online]. c2014-2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/hybridni-vyroba-spojuje-3d-tisk-s-presnym-obrabenim>
- [10] WATERMAN, Pamela. Designing for the Future of Manufacturing. *Digitalengineering247.com* [online]. 2016 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/designing-for-the-future-of-manufacturing/>
- [11] ŠEVČÍK, Ladislav. PLM systém a principy návrhu výrobků. In: *TECH2* [online]. 2009 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/01~TUL/020_PLM%20syst%C3%A9m.pdf
- [12] What is PLM?. *Oracle* [online]. 2020 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.oracle.com/scm/product-lifecycle-management/what-is-plm/>
- [13] Feature Recognition pro Inventor. *CAD.cz* [online]. c2009-2021 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/component/content/article/4224.html>

- [14] DEAN, Al. Shapr3D adds Drawings. *Develop3D* [online]. 2020c [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://develop3d.com/cad/shapr3d-adds-drawings/>
- [15] VAVRUŠKA, Petr. Machine tool control systems and interpolations of spline type. *Engineering Mechanics* [online]. 2012, **19**(4), 219-229 [cit. 2021-05-17]. ISSN 1805-4633. Dostupné z: http://www.engineeringmechanics.cz/pdf/19_4_219.pdf
- [16] JANDEČKA, Karel, Pavel KOŽMÍN a Jiří ČESÁNEK. *Programování NC strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-692-4.
- [17] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I*. 2., dopl. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2278-5.
- [18] Ponorné frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/plunge-milling.aspx>
- [19] Plunge Milling / Roughing: CNC Secret Weapon. *CNC cookbook* [online]. 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/toolpath-secret-weapon-complete-guide-to-plunge-milling-roughing/>
- [20] LI, Zhaoyu, Pengcheng HU, Fubao XIE a Kai TANG. *A variable-depth multi-layer five-axis trochoidal milling method for machining deep freeform 3D slots*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2020, , 15 [cit. 2021-04-15]. ISSN 0736-5845. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584520303033>
- [21] GRÝČ, Jan. Evoluce v trochoidním frézování. *MM spektrum* [online]. 2016 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/evoluce-v-trochoidnim-frezovani>
- [22] Frézování metodou tenkých řezů a trochoidální frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
- [23] What's new in NX for Manufacturing. *Blogs.sw.siemens.com* [online]. 2020 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/whats-new-in-nx-for-manufacturing-december-2020/>
- [24] Co je nového v PowerMill 2021. *Cadstudio* [online]. 2021 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.powermill.cz/co-je-noveho-v-powermill-2021>
- [25] Akademie CNC obrábění (86). *Technický týdeník* [online]. 2012 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-86_8621.html
- [26] Využijte potenciál vašeho frézovacího centra naplno s technologiemi Delcam Vortex a Machine DNA. *Technický týdeník* [online]. 2013 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vyuzijte-potencial-vaseho-frezovaciho-centra-naplno-s-technologiemi-delcam-vortex-a-machine-dna_20620.html
- [27] COELHO, Reginaldo, Adriano DE SOUZA, Alessandro ROGER, Aldo RIGATTI a Alexandre DE LIMA RIBEIRO. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **46**(9-12), 1103-1111 [cit. 2021-03-15]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-009-2183-8
- [28] SMOLÍK, Jan a Matěj SULITKA. Simulace CNC obrábění. *MM spektrum* [online]. c2001-2021 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni>
- [29] Vericut. *AXIOM TECH s.r.o.* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/25426-vericut>
- [30] Vericut: CNC machine simulation software. In: *CGtech* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://www.cgtech.com/images/pdf/VERICUT_Brochure.pdf
- [31] STREICHER, Dietmar. Digitální dvojče: dokonalý nástroj pro zvýšení bezpečnosti výroby: dokonalý nástroj pro zvýšení bezpečnosti výroby. *Cad.cz* [online]. 2019 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/10687-digitalni-dvojce-dokonalny-nastroj-pro-zvyseni-bezpecnosti-vyroby.html>
- [32] Průmysl 4.0: ŠKODA AUTO v závodě ve Vrchlabí využila „digitální dvojče“. *Skoda-storyboard* [online]. 2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/prumysl-4-0-skoda-auto-v-zavode-ve-vrchlabi-vyuzila-digitalni-dvojce/>
- [33] Jak to funguje. *Virtualnivyroba* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://virtualnivyroba.cz/jak-to-funguje/>
- [34] Digitalizace: Digitální dvojče. *Industry Fórum* [online]. c1996-2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.industryforum.cz/digitalni-dvojce>
- [35] PFEIFFER, Sabine. The Vision of “Industrie 4.0” in the Making—a Case of Future Told, Tamed, and Traded. *NanoEthics* [online]. 2017, **11**(1), 107-121 [cit. 2021-04-24]. ISSN 1871-4757. Dostupné z: doi:10.1007/s11569-016-0280-3
- [36] MAŘÍK, Vladimír. *Průmysl 4.0: Výzva pro Českou republiku*. Vydání 1. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [37] Jak rozumět konceptu Průmysl 4.0. *Svaz průmyslu a dopravy České republiky* [online]. 2021 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/aktivita/z-hospodarske-politiky/12973-jak-rozumet-konceptu-prumysl-4-0>
- [38] Průmysl 4.0: Diagram znázorňující 4 industriální revoluce včetně průmyslu 4.0. In: *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl_4.0#/media/Soubor:Industry_4.0_\(cs\).png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl_4.0#/media/Soubor:Industry_4.0_(cs).png)
- [39] BALTUS, Jan. Výhody Průmyslu 4.0 můžeme využít. *Technický týdeník* [online]. 2018 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/vyhody-prumyslu-4-0-muzeme-vyuzit_43786.html
- [40] BOSE-MUNDEOVÁ, Annedore, Mark T. HOSKE, ed. Standard pro digitalizaci CNC. *Vše o průmyslu: Portál pro automatizovanou výrobu* [online]. 2020 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.vseoprumsly.cz/automatizace/automatizace-stroju/standard-pro-digitalizaci-cnc.html>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Protokol z měření stroje

Příloha 2 – Výkres součásti

Příloha 3 – Technologický postup